



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **The colours of the extreme universe**

Calistro Rivera, G.

### **Citation**

Calistro Rivera, G. (2019, January 10). *The colours of the extreme universe*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/68466>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/68466>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/68466> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Calistro, Rivera G.

**Title:** The colours of the extreme universe

**Issue Date:** 2019-01-10

---

# Nederlandse Samenvatting

---

## Het zichtbare universum

U leest deze zinnen op een plek op aarde, één van de acht planeten die om de dichtstbijzijnde ster draaien: de zon. De zon is op haar beurt slechts een onderdeel van een groter geheel bestaande uit honderden miljarden sterren<sup>5</sup> bijeengehouden door de zwaartekracht. Dit geheel wordt gedefinieerd als een sterrenstelsel en de onze wordt de Melkweg genoemd. Naast de Melkweg zijn er triljoenen sterrenstelsels<sup>6</sup> met een grote diversiteit in grootte, vorm en massa, die de bouwstenen vormen van ons zichtbare universum.

Het onderzoeken van het zichtbare universum is een streven inherent aan het mens zijn. Sinds oudsher hebben menselijke beschavingen, van de Babyloniërs tot de Inca's, hun vaardigheden en verbeelding gebruikt om de hemel te observeren en te beschrijven. De wetenschappelijke studie van het zichtbare heelal is echter pas begonnen na het uitvinden/bouwen van de telescoop door Galileo Galilei. De telescoop maakte een ongekende ontwikkeling door die hand in hand ging met de algemene technische vooruitgang. Dit leidde uiteindelijk tot de ontwikkeling van geweldige machines voor het verkennen van het heelal. Deze machines zorgen er niet alleen voor dat ons zicht nu tot onvoorstelbare afstanden reikt, maar breiden ook het zichtbare spectrum uit waardoor we het universum kunnen zien en begrijpen met kleuren die voor mensen niet zichtbaar zijn.

Licht is de belangrijkste bron van informatie voor het bestuderen van het universum. De constante lichtsnelheid,  $c \sim 3 \times 10^8$  m/s, is van grote waarde, omdat dit het mogelijk maakt om terug in de tijd te kijken. Licht geproduceerd in het begin van het universum, bereikt ons nu pas doordat het een constante snelheid heeft. Hierdoor geeft licht ons de mogelijkheid om de gebeurtenissen in het nog jonge universum waar te nemen. De constante snelheid definieert ook de limieten van het waarneembare heelal gezien vanuit onze positie. Licht dat naar ons toe beweegt, wordt door het uitdijen van het heelal ook uitgerekt zodat het een langere golflengte krijgt. Dit fenomeen heet roodverschuiving. Het versnelde uitdijen van het heelal zorgt ervoor dat licht uitgezonden in het jongere universum altijd een hogere roodverschuiving heeft. Roodverschuiving kan dus als een maat voor tijd worden gebruikt, zodat waarnemen met telescopen kan worden beschouwd als tijdreizen. Wanneer we de roodverschuiving van het licht weten, kunnen we ook onze tijdsbestemming bepalen.

De kleur van licht is karakteristiek; het bevat cruciale informatie over de roodverschuiving of de fysieke oorsprong van de straling. De verschillende kleuren zijn afkomstig uit het scala aan golflengten die behoren tot het elektromagnetische spectrum waaruit licht wordt opgemaakt. Het menselijk oog kan slechts een klein deel van het spectrum waarnemen: de optische golflengten. Een groot deel van de informatie over de fysieke oorsprong van de emissie ligt verborgen in de onzichtbaar gewaande golflengten. Laag energetische processen produceren meestal emissie van radio, microgolf en infrarode golven. Hoog energetische processen produceren daarentegen ultraviolette- (UV), Röntgen- en Gammastraling. In deze scriptie hebben we gebruik gemaakt van verschillende telescopen om aan de hand van de emissie van sterrenstelsels over het gehele elektromagnetische spectrum het vroege universum in al zijn verschillende kleuren te beschrijven. We hebben de bestaande grenzen in het onderzoek naar sterrenstelsels met behulp van verschillende golflengten hiermee verlegd. We

---

<sup>5</sup>GAIA DR2 (Gaia Collaboration et al. 2018)

<sup>6</sup>Conselice et al. (2016)

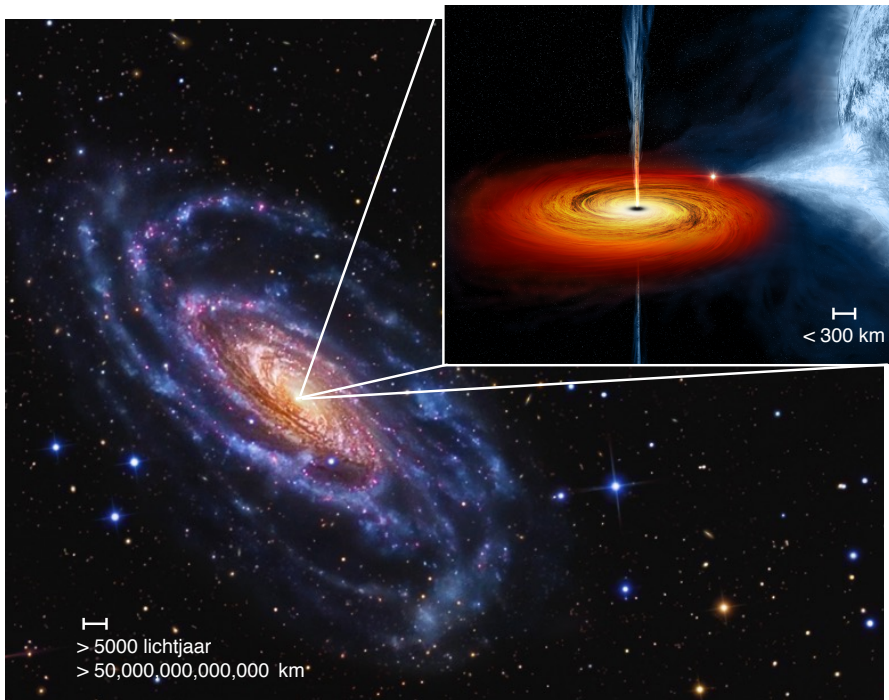


Figure S.10: Vergelijking op schaal van een accreterend zwart gat en het bijbehorende sterrenstelsel. Het grotere figuur is een foto van de optische emissie van het nabije sterrenstelsel NGC 5033 dat twee superzware zwarte gaten bevat in zijn kern. NGC 5033 is populair onder amateur astronomen omdat het door zijn karakteristieke grootte en helderheid gemakkelijk te observeren en af te beelden is. De ingezoomde figuur laat een artist impression zien van het eerste object waarvan algemeen aanvaard werd dat het een zwart gat was (Cygnus X-1). (Credit voor NGC 5033: R. Jay GaBany, Cosmotography, en credit voor de representatie van een zwart gat: NASA/CXC/M.Weiss.)

hebben ook laten zien hoe dit ons een meer compleet fysisch begrip heeft gegeven van het extreme en verre universum.

## De kleuren van sterrenstelsels en zwarte gaten

De fysica van sterrenstelsels is een van de meest bijzondere voorbeelden van fenomenen met een groot golflengtebereik in het universum, aangezien sterrenstelsels helder en karakteristiek licht produceren over alle golflengten. Dit spectrum kan nog verder worden uitgebreid zoals recentelijk is ontdekt in de fysica van compacte objecten, zoals zwarte gaten. Deze objecten produceren niet alleen elektromagnetische golven maar ook gravitatiegolven en leiden het begin in van het multi-messenger tijdperk in de astronomie.

Sterrenstelsels worden in door gravitatie gebonden donkere materie halo's gevormd. Deze materie wordt nog steeds slecht begrepen maar bekend is dat het geen andere interactie kent dan de zwaartekracht. Donkere materie is namelijk, zoals de naam al suggereert, onzichtbaar en produceert geen elektromagnetische golven. De emissie van sterrenstelsels over een groot golflengtebereik is zodanig afkomstig van de baryonische (atomen van elke aard) com-

ponent. De baryonische component van sterrenstelsels is doorgaans verdeeld over de bulge en de schijf structuur en bestaat voornamelijk uit het interstellair medium en sterren. Het interstellair medium bestaat uit een grote hoeveelheid atomisch en moleculair gas en stof en wordt gedomineerd door waterstofatomen. Het produceert emissie met radio, submillimeter en infrarode golflengten. Het geïoniseerde deel van het interstellair medium produceert ook emissie met optische en UV golflengten. Van de moleculaire fase van het interstellair medium wordt aangenomen dat het de grondstof is voor de groei van sterrenstelsels, aangezien dit gas het formatieproces van sterren voedt. De verschillende populaties sterren in sterrenstelsels vormen de meest veelvoorkomende bron van optisch en UV licht in het universum. Dit zien we ook wanneer we op een heldere nacht naar de hemel kijken.

Een van de grootste ontdekkingen in de extragalactische astrofysica is dat de meeste (zo niet alle) sterrenstelsels een zwaar zwart gat in hun centrum hebben. Ook onze eigen Melkweg heeft een dergelijk zwart gat in diens centrum: Sagittarius A\*. Dit zwarte gat is 4 miljoen keer zo zwaar als onze zon. Zwarte gaten zijn zware compacte objecten die zo'n extreem grote potentiaalput hebben dat materie of licht dat zich binnen de waarnemingshorizon bevindt niet kan ontsnappen. Vlak voordat materie deze horizon overschrijdt, vormt het onder de invloed van de zwaartekracht een schijf met daarin alle materie die uiteindelijk in het zwarte gat valt. Figuur 4.1 toont een vergelijking op schaal van een sterrenstelsel en het zwarte gat dat zich in het centrum bevindt. De immense kinetische energie van de invallende schijf kan de meest (voortdurend stralend) heldere en hoog energetische processen in het universum produceren. Sterrenstelsel met deze accretieschijven worden actieve sterrenstelsels genoemd (Engels: Active Galactic Nuclei, AGN). Deze actieve sterrenstelsels zijn op zichzelf een fenomeen met emissie over een groot golflengtebereik en produceren dus straling over het hele elektromagnetische spectrum. De hoog energetische emissie wordt geproduceerd door het invallen van materie in het zwarte gat, wat UV- en Röntgenstraling creëert. Geabsorbeerde en weer uitgezonden emissie en indirecte emissie ontstaan door interacties met bijv. stof of magnetische velden produceren daarnaast emissie van infrarode en radio golven.

## **Een nieuwe methode voor het karakteriseren van de emissie van sterrenstelsels en accreterende zwarte gaten over een groot bereik van golflengten.**

Een van de meeste efficiënte methodes voor het bepalen van fysische eigenschappen van sterrenstelsels en zwarte gaten is het modelleren van de emissie van zulke objecten over een groot bereik van golflengten, de zogeheten Spectral Energy Distribution (SED, NL: Spectrale Energieverdeling). In Hoofdstuk 2 hebben we de software AGNfitter ontwikkeld om zulke SEDs van sterrenstelsels en AGN op consistente wijze te modelleren. AGNfitter maakt gebruik van Bayesische statistiek om te zien welk model de gemeten SED het beste beschrijft, vanaf het ultraviolet tot aan het submillimeter. Hierbij wordt gebruik gemaakt van semi-empirische en theoretische modellen van de verschillende fysische componenten. De door ons gepresenteerde methode is nieuw, aangezien we de kansdichtheidsverdelingen van de fundamentele fysische parameters van sterrenstelsels en AGN berekenen, zoals de totale massa van de sterren, de mate van stervorming en de totale lichtkracht van de AGN, welk op zijn beurt weer afhangt van de massa van het zwarte gat en de mate van verduistering door kosmisch stof. De foutmarges op deze parameters worden op een robuuste manier bepaald, door de manier waarop de volledige parameterruimte wordt doorlopen, daarbij gebruikmakend van de fotometrische waarnemingen gedaan bij meerdere golflengten en de bijbehorende meetonzekerheden. AGNfitter is een modulaire en open-source Python code, en heeft sterk bijgedragen

aan ten minste 20 verschillende onderzoeken in de afgelopen twee jaar, zowel binnen onze collaboratie als daarbuiten. In Hoofdstuk 2 hebben we bovendien deze methode getest en gevalideerd door middel van het genereren van 2000 SEDs voor AGN - actief toen het heelal slechts een kwart van de huidige leeftijd had - welk zijn geselecteerd door middel van hun Röntgenstraling. Ons onderzoek heeft aangetoond dat het modelleren van de SED van AGN, lopende van de ver-infrarode (VIR) tot de ultraviolette golflengten, op robuuste wijze de fysische eigenschappen en parameters kan bepalen van zowel emissie afkomstig van het zwarte gat als van de sterren zelf, ondanks dat feit dat deze processen zich op schalen afspelen die met  $\sim 7$  ordes van grootte verschillen.

## Een nieuwe blik op de fysica van sterrenstelsels en zwarte gaten

De unieke combinatie van resolutie, zichtveld en gevoeligheid van de LOFAR telescoop (Low Frequency Array, NL: Lage Frequentie Ontvanger), maakt het mogelijk om grote vooruitgang te boeken in het gebruik van het lage-frequentie radiobereik voor het bestuderen van de groei en evolutie van sterrenstelsels in het vroege universum, zoals hun mate van stervorming. In Hoofdstuk 3 hebben we de eerste studie naar de evolutie van sterrenstelsels en AGN op lage radiofrequenties uitgevoerd. Hiermee hebben we de fysische eigenschappen van zowel stervormende sterrenstelsels als AGN bepaald. Beide soorten sterrenstelsels zijn geselecteerd op basis van hun emissie op radio-golflengten, tot op een roodverschuiving van  $z \sim 2.5$ , toen het universum slechts een vijfde van de huidige leeftijd had. We hebben hiervoor de diepste radiowaarnemingen op meerdere frequenties bijeengevoegd, en gebruik gemaakt van nauwkeurige extractie van radiobronnen en kalibratietechnieken op omvangrijke radioafbeeldingen, afkomstig van verschillende radiotelescopen, zoals LOFAR, de VLA, WRST en GMRT. Het onderzoek focuste op stervormende stelsels, waarbij de radiostraling voornamelijk afkomstig is van recent gevormde sterren. De radio emissie van het zwarte gat is dan in vergelijking hierbij te verwaarlozen. Met de geselecteerde stervormende stelsels hebben we op verscheiden frequenties een karakteristieke eigenschap van zulke stelsels onderzocht; de ver-infrarood(VIR)-radio correlatie. De resultaten van Hoofdstuk 3 onthulden dat de VIR-radio correlatie blijkt te evolueren als functie van kosmische tijd, wat in tegenstelling is tot wat is gesuggereerd door eerdere studies. Daarnaast hebben we radio emissie op lage frequenties (150 MHz) gerelateerd aan stervorming en accretie op het centrale zwarte gat door middel van het modelleren van de VIR-UV spectrale energieverdelingen. Hiermee hebben we de eerste calibratie van de 150 MHz radio-emissie opgesteld als maat voor de hoeveelheid stervorming die plaatsvindt.

## Een nieuw perspectief op het interstellair medium door middel van hoge resolutie waarnemingen

Het interstellair medium van sterrenstelsels vormt de voedingsbron voor zowel de formatie van sterren als de groei van zwarte gaten, en is daardoor een belangrijk ingrediënt in de evolutie van sterrenstelsels. Met de komst van de grootste submillimetertelescoop op aarde, het Atacama Large (sub-)Millimeter Array (ALMA; de Atacama Grote (sub-)Millimeter Ontvanger), is het nu mogelijk om het interstellair medium in detail te karakteriseren. Om het interstellair medium van sterrenstelsels in het vroege universum te bestuderen, wordt voornamelijk gebruikgemaakt van de rotationele emissielijnen van het moleculair koolstofmonoxide (CO),

de fijnstructuur emissielijn [CII] of de continuümstraling van kosmisch stof (in het zogeheten Rayleigh-Jeans regime). Deze lijnen behoeven echter verschillende aannames over de fysische toestanden van het gas en stof in sterrenstelsels, betreffende de optische diepte, temperatuur en dichtheid van het gas alsmede de ratio tussen de hoeveelheid stof en gas. Slechts met zulke aannames kunnen de lijnen worden gebruikt voor het karakteriseren van het interstellair medium, zodat de fysische toestanden die hieruit worden afgeleid grote onzekerheden met zich meebrengen. In Hoofdstukken 4 en 5 hebben we de CO(3-2) en [CII] emissielijnen gekarakteriseerd met behulp van hoge-resolutie waarnemingen van ALMA, voor een verzameling sterrenstelsels geselecteerd op basis van hun submillimeter emissie (zogeheten submillimeter galaxies; SMGs), met als doel het ophelderen van deze onzekerheden. Door het modelleren van de dynamica hebben we de snelheidsvelden van deze stelsels bepaald, welke laten zien dat de CO-emissie van de SMGs consistent is met dat van een geordende, roterende schijf, ondanks de ogenschijnlijk verstoorde morfologie van de stelsels die is te zien in optische waarnemingen. Dit suggereert dat dat een schijf van moleculair gas zich snel kan hervormen na een botsing tussen twee sterrenstelsels. Met verder onderzoek naar de [CII]-emissie en het ver-infrarood continuüm in Hoofdstuk 5 hebben we aangetoond dat deze sterrenstelsels een sterk tekort vertonen in hun [CII]/VIR-ratio in vergelijking met resultaten afkomstig van eerdere studies. Door onze resultaten te vergelijken met modellen van foto-dissociatie regio's, laten we zien dat dit tekort waarschijnlijk wordt veroorzaakt door thermische saturatie van de [CII] energieniveaus, en door een sterke vermindering in de verwarming van het gas door het foto-elektrisch effect.

## Een nieuw perspectief op de emissie van sterrenstelsels over een groot golflengtebereik door middel van hoge resolutie waarnemingen

Een zuivere karakterisering van de fysische toestand van sterrenstelsels behoeft waarnemingen op meerdere golflengten, en dit geldt evenzo voor studies die gebruikmaken van observaties met hoge resolutie. Slechts met een klein aantal telescopen is het echter mogelijk om resoluties te bereiken die scherper zijn dan een boogseconde, zodat het lastig is om de verschillende onderdelen van sterrenstelsels op hoge roodverschuiving te onderscheiden, aangezien deze worden vertroebeld door de eindige resolutie van een telescoop. In Hoofdstukken 4 en 5 hebben we ALMA waarnemingen gecombineerd met hoge-resolutie afbeeldingen van de Hubble Space Telescope (HST; de Hubble Ruimtetelescoop) om de emissie van sterren, het stof en de CO en [CII] emissielijnen te bestuderen in sterrenstelsels in het vroege universum, welke zijn geselecteerd op basis van hun submillimeter emissie. Na het corrigeren van de astrometrie met behulp van GAIA waarnemingen, heeft ons werk aangetoond dat de ruimtelijke distributie van het stof en moleculaire gas sterk gescheiden kan zijn van de regio's waarin de waargenomen straling voornamelijk wordt geproduceerd door sterren. Deze bevindingen trekken veelgebruikte aannames met betrekking tot een energiebalans tussen de emissie van sterren en stof in twijfel. Daarnaast benadrukken de bevindingen het vermogen van gecombineerde ALMA en HST waarnemingen om onze kennis van de fysica van sterrenstelsels op hoge roodverschuiving te vergroten. Ten slotte hebben we een statistische analyse uitgevoerd door het opeenstapelen (Engels: stacking) van de waargenomen afmetingen van de regionen van stof-continuümstraling, moleculair gas en emissie van sterren in onze SMGs. Dit werk heeft aangetoond dat het koude moleculaire gas en de stellaire emissie van onze sterrenstelsels verder reiken in ruimtelijke zin dan zowel het stof als de regio van [CII]-emissie, met meer dan een factor twee verschil. Om deze waarneming verder te begrijpen, en te onder-

zoeken of er een fysisch verschil is in de distributie van gas en stof, hebben we een model van stralingstransport toegepast op de gemiddelde radiële profielen van onze stelsels. Dit heeft aangetoond dat dit verschil in de waargenomen afmetingen van het gas en stof kan worden verklaard door sterke gradiënten in de temperatuur en optische diepte in onze sterrenstelsels.